

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 23220111153231

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

潜艇故障诊断与自适应容错控制一体化设计

Integrated design of fault diagnosis and fault-tolerant
control for submarine

雷治国

指导教师姓名: 余 臻 教 授

刘 利 军 博 士

专 业 名 称: 控制理论与控制工程

论文提交日期: 2014 年 月

论文答辩时间: 2014 年 月

学位授予日期: 2014 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2014 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

潜艇作为现代海军力量的重要组成部分，在近代海战中扮演着重要角色。其隐蔽性好、威力大、战术机动性强，受到了世界各国海军的重视。随着潜艇的科技含量越来越高，潜艇的运行情况与任务计划也变得更加复杂，对潜艇的安全性提出了新的挑战。当潜艇在近海面运行时，由于海浪、水草等因素，与潜伏状态相比运行环境更为严峻。潜艇艏艉升降舵故障是主要的潜艇安全故障之一。如果不采取合适的控制方法，潜艇很容易被海浪吸出水面，以致露背暴露行踪。

在现有的舰艇作战系统中，由于实时性、可靠性等特殊要求，通常采用基于硬件实现的冗余备份技术。但是硬件冗余备份成本高、体积大、质量重，在潜艇的很多地方都无法实施，对于一些不可预知的故障，特别是执行器故障，往往也无能为力。但是如果采取硬件冗余备份，当潜艇出现故障时仍采用固有的控制器将是一个很危险的事情。集成故障诊断的自适应容错控制方法恰好能弥补硬件容错控制设计的缺点。

文章选取在近海面运行的潜艇作为研究对象，研究了潜艇执行器出现故障时的容错控制问题。首先，考虑了在近水面航行时波浪对潜艇的干扰，对潜艇的六自由度运动模型进行简化，得到了潜艇近海面运行时垂直面的线性状态空间模型；然后，根据 H_∞ 状态反馈理论设计了潜艇 H_∞ 状态反馈控制器；最后，根据潜艇艏艉舵故障时的垂直面运动线性故障模型，设计了一个未知输入的状态观测器，将潜艇的外界干扰与执行器故障解耦，得到仅包含艏艉舵故障参数故障的观测器方程，设计了带射影限制的自适应故障参数跟踪律诊断故障参数，并利用得到的故障参数求解线性矩阵不等式，并设计自适应 H_∞ 状态反馈容错控制器。通过与 H_∞ 状态反馈设计相比，集成故障诊断与容错控制一体化对潜艇执行器故障时的容错性能更好，并且潜艇深度和纵倾角的控制作用也更加良好。

关键词：潜艇垂直面；近水面； H_∞ 鲁棒控制；故障诊断与容错控制

Abstract

As an important part of modern naval power, submarine plays an important role in modern naval battle. Because of its good concealment and the characteristics of powerful and maneuverable, it is being highly concerned by the navies all over the world. As the improvement of performance, operating condition and mission of submarine are becoming more and more complex, and the submarine's security problem is becoming more serious. However, the operating condition even becomes more difficult when the submarine is close to the surface due to adverse effects of sea condition, such as the effects of sea wave and sea seaweed. If not been taken appropriate controller, the submarine will be easy to suck out of the water and exposure its position. However, submarine's rudder fault is one of the major submarine's failure.

In the existing ship combating system, due to the special requirements such as real-time, reliability, the redundancy backup technology based on hardware implementation is usually adopted. However, due to the high cost of hardware redundancy backup, big volume and heavy quality, many parts of the submarine are unable to use hardware redundancy backup. In addition to some unpredictable faults, especially the actuator fault, the redundancy backup technology often can't help it. But if don't take the hardware redundancy backup, the submarine will be in dangerous. Integrated fault diagnosis method of adaptive fault-tolerant control can just make up for that.

In this thesis, a controller base on H_∞ robust control theory is designed and an adaptive fault-tolerant controller for submarine is designed in case of submarine bow and stern rudder fault, which is integrated with fault identification. It is assumed that any prior fault information is not known and the disturbance force act on the vehicle. An unknown input state observer is used to decouple the disturbance and the actuator fault, then an adaptive control law with projection is used to estimated rudder fault parameter. Base on the estimated fault parameters, a state feedback control law is designed to ensure that the system satisfies the robust H_∞ performance. Then an adaptive fault-tolerant robust controller is designed base on the estimated fault parameters. Such adaptive fault-tolerant robust control scheme has a good properties of adaptability and robustness, improves the dynamic

performance of the control system with actuator failure.

Key Words: submarine depth control; near surface; H_∞ robust control; fault diagnosis and fault-tolerance

厦门大学博硕士论文摘要库

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪论.....	6
1.1 课题研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 潜艇操纵性的研究.....	3
1.2.2 故障诊断与容错控制设计方法.....	4
1.2.2.1 容错控制设计方法.....	4
1.2.2.2 故障检测与诊断方法.....	6
1.2.2.3 故障诊断与容错控制一体化设计方法.....	7
1.3 论文的主要内容和结构安排.....	8
第二章 潜艇操纵性与垂直面运动模型.....	10
2.1 潜艇操纵性的简介.....	10
2.2 潜艇近水面运动的研究.....	10
2.3 潜艇操纵运动的坐标定义.....	12
2.4 海水波浪力建模.....	18
2.5 潜艇近水面运动模型.....	21
2.6 本章小结.....	22
第三章 潜艇垂直面深度的 H_∞ 鲁棒控制.....	23
3.1 潜艇 H_∞ 鲁棒控制.....	23
3.2 H_∞ 控制鲁棒控制发展.....	23
3.3 H_∞ 鲁棒控制理论.....	25
3.4 H_∞ 标准问题.....	27
3.5 H_∞ 状态反馈控制器设计.....	28
3.6 潜艇 H_∞ 控制器设计.....	30
3.7 仿真与验证.....	31
3.8 总结.....	38

第四章 故障诊断与自适应 H_{∞} 状态反馈容错控制一体化设计	39
4.1 引言	39
4.2 故障模型与分类	39
4.3 潜艇执行器故障模型	41
4.4 故障观测器设计	42
4.5 设计带影射限制的自适应跟踪律	44
4.6 集成故障参数的 H_{∞} 自适应状态反馈控制器设计	48
4.7 设计和仿真	50
4.8 结语	58
第五章 结论与展望	59
参考文献	60
作者在攻读硕士期间发表的论文	64
致 谢	65

Contents

Abstract(In Chinese)	I
Abstract(In English)	II
Chapter 1 Introduction	6
1.1 Background and Significance	1
1.2 Research Status and Analysis of Home and Abroad	2
1.2.1 Overview of Submarine Control.....	3
1.2.2 Methods of Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control Design.....	4
1.2.2.1 Methods of Fault-tolerant Control Design.....	4
1.2.2.2 Methods of Fault Detection and Diagnosis.....	6
1.2.2.3 Integrated Design Methods of Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control	7
1.3 Main Contents of the Dissertation	8
Chapter 2 Submarine Maneuverability and Model of Submarine Vehicle	10
2.1 Introduction of Submarine Maneuverability	10
2.2 Overview the Research of Submarine near Surface	10
2.3 Define the Coordinate of Submarine Motion	12
2.4 Seawave Model	18
2.5 Model of Submarine Vehicle Near Surface	21
2.6 Chapter summary	22
Chapter 3 H_∞ Depth Control of Submarine Vehicle	23
3.1 Introduction of H_∞ Depth Control	23
3.2 Development of H_∞ Robust Control Theory	23
3.3 H_∞ Robust Control Theory	25
3.4 Standard H_∞ Problem	27
3.5 H_∞ State Feedback Control	28
3.6 Design Controller of Submarine Vehicle	30
3.7 Simulation	31
3.8 Chapter summary	38
Chapter 4 Integrated Design of Fault Diagnosis and Adaptive Fault-tolerant State Feedback	39
4.1 Introduction	39

4.2 Fault Model and Classification	39
4.3 Model of Submarine With Actuator Fault	41
4.4 Design of An Unknown Input State Observer	42
4.5 Adaptive Identification of Actuator Fault Parameters	44
4.6 Adaptive Fault-tolerant H_{∞} State Feedback Controller Design with Estimation Fault Parameter	48
4.7 Design and Simulation	50
4.8 Chapter summary	58
Chapter 5 Conclusion and Prospect	59
References	60
Published Papers of Author	64
Acknowledgements	65

第一章 绪论

1.1 课题研究背景

蓝色的海洋总能激起人们无限的好奇和想象。海洋不仅为人类提供了基本的生存环境，还提供了丰富的渔业、能源以及运输资源。随着陆地资源渐进枯竭，世界各国开始把经济发展重点转向海洋。丰厚的海洋资源成为各国争夺的对象。当今海洋地位的日益提高和经济发展全球化的大趋势，控制海上航线更是等于控制各国的经济命脉，因此围绕海洋利益的争端有着愈演愈烈的趋势，海洋成为各国展示经济军事实力的重要平台。潜艇作为现代海军重要力量，在海战中扮演了举足轻重的角色。从美国南北战争时期，潜艇首次击沉战舰；到第一次世界大战时期，德国潜艇“U19”在 1 小时内击沉了三艘英国万吨巨舰，轰动世界；再到第二次世界大战时期，在潜艇的助力下成功偷袭斯卡帕湾。潜艇以其隐蔽性好，杀伤力大和作战时空间机动性强的特点受到了世界各国海军的重视。据统计在第一次世界大战中，参战潜艇 289 艘，击沉协约国商船 5906 艘，总计 1400 万吨，其中战舰 340 多艘。在第二次世界大战中，潜艇击沉各种运输船 5000 多艘，总计约 2000 万吨；击沉击伤各型军舰 380 多艘^[1]。在马岛海战和海湾战争中，潜艇也发挥了重要的作用。根据潜艇的动力来源，潜艇主要分为核动力潜艇和常规动力潜艇，两者各具优点。核潜艇是搭载核反应堆提供动力的潜艇。核潜艇不需要空气推进，高速运转的核反应堆赋予了核潜艇功率大、航速高、续航能力强、装载武器多的众多优点。当然核技术的高额成本也意味着核潜艇只为少数国家拥有。目前承认拥有核潜艇的国家有英、法、美、俄、印、中六国。常规动力潜艇采用柴电为动力源，与核潜艇相比，具有低噪声、低价格、建造简单、可在浅水区域活动、适应近海作战等特点。随着各国海军战略由全球转向地区、由远洋转向近海，常规动力潜艇再次受到各国的重视。近年来，潜艇研发被各国置于重要位置。老牌潜艇国家英、法、德、日等都开始着手研发新型潜艇。一部分新兴国家如韩国、澳大利亚等也组建潜艇部队，掀起了潜艇的购买与研发热潮。由于中国南海的领海争端问题日趋严峻，一些东南亚国家也将潜艇加入了海军的采购计划^[2]。可以看出潜艇仍处于大力发展时期，仍然是未来海战中不可小觑的军事

力量。

潜艇由于工作环境恶劣，与常规舰艇相比安全问题更加突出^[3]。潜艇运行的海洋环境复杂多样，艇内的高温、高湿、摇晃、海水压力与腐蚀时时刻刻挑战着潜艇的正常运行。集生活、作战、运输为一体，潜艇作为一个大量控制元件的大型控制系统，包含成百上千台子设备，每个子系统与元器件大都是单件或小批量生产，可靠性有待验证，再加上因为设计问题、器件老化、线路故障、外界灾害、人为损毁、操作有误以及软件问题等发生故障，进而诱使潜艇控制系统发生故障。可以说潜艇无时无刻不受到故障的威胁，而一旦控制系统发生故障，将会造成无法挽回的损失。在历史上，关于潜艇的灾难事故时有发生，数以千记的艇员因此命丧海底。据不完全统计，在近一个世纪，除去战争原因，各国潜艇在非战争环境发生的重大事故多达四百多起，其中因此沉没的潜艇多达 170 多艘，近三千名艇员命陨海底^[4]。例如：1970 年 4 月 8 日，前苏联第一代核潜艇“K-18”执行完军事任务后在返航途中起火，随后核潜艇逐渐倾斜，最终沉入海底，造成艇上 52 人死亡^[5]。再例如：2011 年 5 月 11 日，由英国皇家海军耗巨资打造的“机敏”号核潜艇在经历水平舵故障的机械事故后，险些导致艇毁人亡，由于挽救及时最终幸免于难，被拖回了基地。潜艇水平舵分为艏艉两部分，主要用来控制潜艇的深度，是潜艇执行器的总要部分，通常由液压控制。如果潜艇水平舵完全失效，那么艇和艇员将一起葬身大海。在我国的潜艇史上，也发生过多起潜艇失事事故。2003 年 5 月 2 日，我国一艘常规动力潜艇“361”因设备出现故障失事，艇上的军官和潜艇一起命陨海底，这对国家和人民来说都是巨大的损失。

这都说明在设计潜艇的控制系统时，考虑一些常见的故障是非常有必要的。当故障发生时，预先的故障容错设计和合理的故障应对手段对系统安全性至关重要。“机敏”号事故更加说明当执行器出现故障后，如果采用适当的挽救措施和合理的操作控制策略，将能有效的避免悲剧的发生。因此针对潜艇的故障检测与自适应容错控制设计对潜艇安全性意义重大。

1.2 国内外研究现状

潜艇控制系统庞大且操纵性复杂，受潜艇控制系统建模难度大、水动力系数及海洋状态复杂性等因素影响，对潜艇操纵性的研究主要是基于潜艇的六自由度

空间运动模型。本文也只选取了潜艇近海面运行时垂直面的操纵性作容错控制研究。

1.2.1 潜艇操纵性的研究

现代水下作战空间的扩大、潜艇武器系统的升级以及反潜探测技术的提高都要求潜艇有良好的空间机动性。当潜艇在水下发动进攻时，潜艇的空间位置、姿势以及运动状态对命中目标有着极其重要的影响。因此潜艇只有保持良好的机动性才能抓住宝贵的作战时机，迅速占据有利战位，调整好姿态发射武器，在完成攻击后，以良好的躲避方式退出战场，以免被反潜武器击中。可以看出良好的空间机动性是潜艇快准狠地击中目标并且保护自己的有利技术保障。潜艇空间机动控制也因此成为潜艇控制的主要研究方向。潜艇良好的空间机动性和作战能力又称为潜艇的操纵性。潜艇的操纵性是评价潜艇综合性能的主要指标。因为潜艇垂直面的运动是潜艇完成任务使命的关键，所以对潜艇操纵性的研究主要集中在潜艇垂直面的操纵性研究。

国内外众多学者对潜艇操纵性做出了大量研究^[6-13]。最早期仅是针对潜艇深度和航向分别进行单输入单输出控制。1961 年，KJ 科肯伯格^[7]将 PID 应用于 108 级潜艇自动舵系统，对潜艇操作性的研究具有重要参考意义。随着计算机技术的发展和相关硬件技术的提高，从二十世纪八十年代开始，大量学者将变结构控制理论运用于潜艇操纵性控制，以解决潜艇系统参数变化和外部抖动问题，提高系统的鲁棒性。国内针对潜艇操纵性的研究起步较晚，主要成果有：王正国^[11]等针对潜艇垂直运动控制系统在运动中存在的耦合问题设计了解耦控制器，将系统分解为两个 SISO 系统。罗凯^[12]等人针对潜艇垂直面 MIMO 非线性系统设计了操舵滑模控制律，研究了潜艇定深运动与潜伏运动的问题。张常波^[13]等人将卡尔曼滤波器应用在潜艇垂直面运动，提高输入信号品质，减小无效操舵现象。

由于潜艇工作环境恶劣、运行情况复杂，考虑潜艇故障时的系统自适应性是非常有必要的。当潜艇艏艉舵出现故障时，如果继续采用固有的自适应控制器可能造成严重的后果。在现有的舰艇作战系统中，为了保证系统的实时性和稳定可靠性，在处理故障时通常采用基于硬件冗余的备份技术。但是硬件冗余备份成本高、体积大、质量重，在潜艇的很多地方都无法进行，此外对于一些不可预知的

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库